

# 減圧沸騰を伴う先細末広ノズルの性能特性\*

## (第3報, ノズル内に設置された細線の影響とボイド率分布)

藤井 照重<sup>\*1</sup>, 太田 淳一<sup>\*1</sup>, 竹中 信幸<sup>\*1</sup>  
浅野 等<sup>\*2</sup>, 小野 厚夫<sup>\*3</sup>

# Performance Characteristics of Convergent-Divergent Nozzles for Subcooled Hot Water

## (3rd Report, Effect of Induced Turbulence on Nozzle Performance)

Terushige FUJII, Junichi OHTA, Nobuyuki TAKENAKA,  
Hitoshi ASANO and Atsuo ONO

A thin wire is installed just upstream of the throat in a convergent-divergent nozzle in order to decrease pressure undershoot (that is, the degree of the thermal nonequilibrium) at the throat. To study the effect of the wire diameter (0.3 to 1.5 mm) on the nozzle performance, experiments have been carried out using initially subcooled hot water under inlet pressures of 0.47, 0.62 and 0.77 MPa, and inlet subcoolings of 6, 12, and 19 K. The one-dimensional void fraction is measured. Moreover, the measured pressure profiles and void fractions are compared with those calculated using the code "MINI-TRAC". The results are summarized as follows: (1) The greater the inlet subcooling or the lower the inlet pressure, the greater the improvement (using the method of a wire installation) of the nozzle performance. (2) The difference of the wire diameter has little effect on the nozzle performance. The pressure profiles for the nozzle with the wire agree with those calculated from the code "MINI-TRAC". (3) The one-dimensional void fraction profile can be obtained using real-time neutron radiography and image processing.

**Key Words:** Multiphase Flow, Energy Conversion, Thermal Efficiency, Nonequilibrium, Nozzle Performance, Void Fraction, Neutron Radiography

## 1. 緒 言

地熱や低温排熱の有効利用の観点から、熱水あるいは低乾き度蒸気の有する熱エネルギーを効率よく動力に変換できる動力変換機が必要とされている。その一つとしてトータルフロータービン(二相流膨張機)<sup>(1)</sup>システムがあるが、その全体効率は二相流膨張機の効率に大きく依存し<sup>(2)(3)</sup>、ターボ形膨張機を用いる場合には、特に高性能ノズルの開発が重要な課題となっている<sup>(4)~(10)</sup>。第1報<sup>(11)</sup>では入口サブクール熱水を用いる場合に対してノズルの設計指針を得るための実験結果を報告した。そしてノズル効率低下の原因として、ノズルのど部近傍での熱力学的非平衡現象と、気液二相流流間のスリップ比の存在をあげた。第2報<sup>(12)</sup>では、性能低下の原因の一つである圧力アンダシュート減少のためにノズル先細部の減圧速度減少の方法とのど部近傍に細線を設置する方法を提案し、その結果について述べた。従来、この種の研究としては、サブクール熱水に蒸気をアシストする実験<sup>(7)</sup>、サブクール熱水をノズル入口でスワールさせる実験<sup>(8)</sup>が行われ、効率の向

上が示されている。また Fincke ら<sup>(20)</sup>は先細部上流 6 cm の位置に設置されたメッシュによって作られる乱れの影響を調べ、その設置により臨界流量と熱力学的非平衡の程度の変化することを示した。また、中川らは平板をノズル入口から軸方向に挿入し減圧沸騰を促進する実験<sup>(26)</sup>を行った。ノズルの解析的研究は多くあり、近年では竹永ら<sup>(23)</sup>、中川ら<sup>(24)(25)</sup>の解析などや二流体モデルに基づく Ardron ら<sup>(21)</sup>、Richter ら<sup>(22)</sup>の解析がある。

表 1 ノズル仕様

Nozzle	Dt (mm)	De (mm)	Ae/At	Dln (mm)	Zc (mm)	Ze (mm)
①	3.12	15.0	23.1	27.1	50.0	113.0
②	3.29	15.1	21.1	27.1	50.0	113.5
③	3.33	15.2	20.8	27.1	50.2	113.1
④	3.29	15.2	21.3	27.1	50.2	113.9
⑤	3.00	10.0	11.1	20.0	34.0	70.0

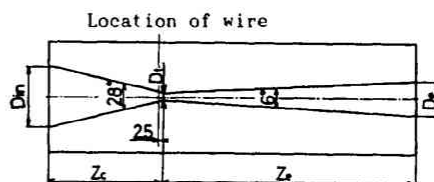


図 1 ノズル形状

\* 原稿受付 平成2年3月22日。

<sup>\*1</sup> 神戸大学工学部 (〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)。

<sup>\*2</sup> 神戸大学大学院。

<sup>\*3</sup> 神戸大学教養部。

本報では設置する細線直径が圧力分布、推力、推力係数、臨界流量に及ぼす影響を調べるとともに、入口圧力、入口サブクール度をより変化させた実験を行い、その基礎的特性を実験的に明らかにすることを目的とする。また、ノズル内流動の情報を得るために実時間中性子ラジオグラフィーを用い

てノズル内の可視化を行い、軸方向一次元ボイド率分布を測定した。さらに、それらの実験結果を数値解析コード MINI-TRAC による計算結果と比較する。

## 2. 実験装置と方法

実験装置および測定方法については第2報<sup>(12)</sup>で述べたので省略する。供試ノズルは図1(断面形状)および表1(仕様)に示す円形流路の5種類の先細末広ノズルで、すべてエッジ状のど部を有している。ノズル⑧、⑨、⑩、⑪は高温用エポキシ樹脂製であり、ノズル⑫は中性子ラジオグラフィー実験用で、硬質アルミニウム製である。広がり角はどのノズルも第1報<sup>(11)</sup>で最大推力係数を示した $6^\circ$ としている。ノズル⑧は絞り角 $28^\circ$ の標準ノズルである。それに対してノズル⑨、⑩、⑪はノズルのど部上流2.5 mmの位置にそれぞれ直径1.5, 0.7, 0.3 mmの3種類のステンレス線の流れに垂直に1本ずつ設置したものである。ノズル⑫はノズル⑧と同一形状のノズルであるが、末広部の長さすなわち出口断面積が異なっている。

実験条件はノズル入口圧力  $P_{in} \approx 0.47, 0.77$  MPa の2とおり、そして入口サブクール度  $\Delta T_{subin} \approx 6, 12, 19$  K の3とおりに設定した。また背圧はエゼクタによって  $P_b = 8 \sim 101.3$  kPa の範囲で変化させた。

## 3. 実験結果

**3.1 適正膨張圧力分布** 各ノズルについて入口圧力  $P_{in} \approx 0.77$  MPa, 入口サブクール度  $\Delta T_{subin} \approx 12$  K 一定における適正圧力分布曲線が図2(a), (b)に示されている。ここで、標準ノズル⑧の適正圧力分布が

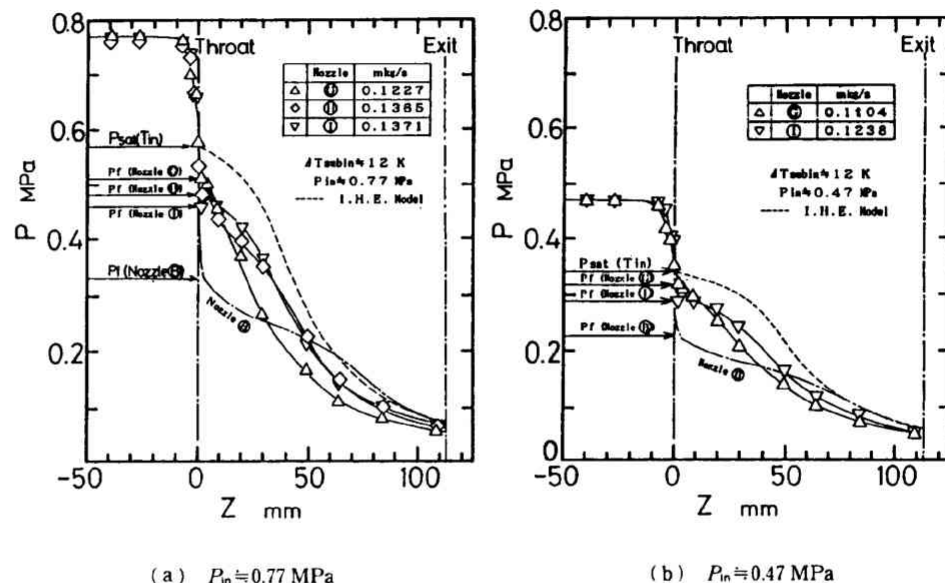


図2 適正膨張圧力分布

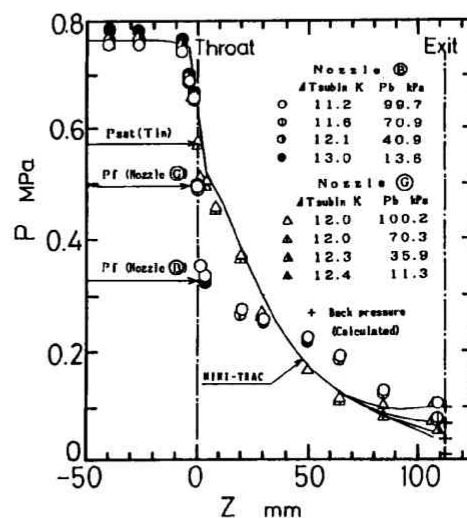


図3 測定圧力分布と解析結果との比較

一点鎖線で、I. H. E. モデル (Isentropic Homogeneous Equilibrium Model) による計算結果が破線で表されている。入口水温に対応する飽和圧力 (図2中、 $P_{sat}(T_{in})$  で示す) と図2(a)の  $P_f$  で示す圧力との差を前報<sup>(12)</sup>に従い圧力アンダシュートと呼ぶ。一般に圧力アンダシュートが大きい場合、熱力学的非平衡の程度も大きくなるので、圧力アンダシュートと熱力学的非平衡の程度とは関係があると考えられる。図2(a), (b)から細線の設置 (ノズル⑨、⑩、⑪) により圧力アンダシュートの値は大幅に低減されることがわかる。末広部では、ノズル⑨、⑩、⑪の圧力分布がI. H. E. モデルによる計算結果により近づく。

### 3.2 MINI-TRAC による計算結果との比較

MINI-TRAC コードは一次元二流体モデルの解析プログラムである<sup>(13)</sup>。数値解法は、SETS 法(Stability Enhancing Two-Step Method)により、計算条件として入口圧力・温度、出口圧力を与える。分割はどの部がセルの境界になるようにノズル長さに合わせて先細部を6個、末広部を14個と等分割する。すなわち、中性子ラジオグラフィ用ノズルのセル長さは5 mm、その他のノズルのそれは8 mm である。

ここでは細線を設置していない標準ノズル⑩および図2(a)より  $P_{in} \approx 0.77$  MPa において圧力アンダシュートが最も小さかったノズル⑥(直径1.5 mmの細線設置)の実験値と計算値との比較を行う。 $P_{in} \approx 0.77$  MPa, 入口サブクール度  $\Delta T_{subin} \approx 12$  K における MINI-TRAC コードによる軸方向静圧分布の計算結果を実線で、実験結果をノズル⑩は記号○、ノズル⑥は記号△で図3に示す。また、背圧は4とあり( $P_b = 100, 70, 40, 10$  kPa)に変化させた。計算の圧力分布はノズル⑩に対しては圧力アンダシュートが小さく、ノズル⑥の圧力分布と非常によく一致する。この結果より、少なくとも本実験の圧力範囲では MINI-TRAC コードによる熱力学的非平衡現象の程度、すなわち圧力アンダシュート、の評価が小さいと考えられる。

**3.3 臨界流量** 各ノズルの臨界流量  $G_c$  の測定結果が  $P_{in} \approx 0.77, 0.47$  MPa の各場合に対して入口サブクール度をパラメータとして図4に示されている。また図4中の破線は IHE モデル、一点鎖線は Henry-Fauske モデル<sup>(17)</sup>、二点鎖線は MINI-TRAC コードによる計算結果である。図4より細線設置ノズルの臨界流量は、 $P_{in} \approx 0.77$  MPa の場合に細線直径にあまり

影響を受けず  $P_{in} \approx 0.47$  MPa の場合に細線直径の大きいほうが少なく、いずれの場合にも標準ノズルの  $G_c$  より少ない。また、標準ノズルの測定結果は MINI-TRAC コードの計算結果より大きい。この理由は次のとおりである。前報<sup>(12)</sup>で述べたように  $G_c$  は圧力アンダシュートが大きいほど増大する。計算では図3に示すように圧力アンダシュートはノズル⑩に対して小さくなっている。したがって、計算値の  $G_c$  は測定値より小さいと考えられる。

**3.4 推力と推力係数** タービン性能にとって重要となる推力、推力係数について述べる。

**3.4.1 ノズル推力** ノズル⑩, ⑥, ⑩, ①における背圧  $P_b$  と推力  $F$  の関係が入口圧力  $P_{in} \approx 0.77$  MPa, 入口サブクール度  $\Delta T_{subin} \approx 12$  K に対しそれぞれ図5に示されている。推力は背圧の増加とともにほぼ直線的に減少する。これは、推力がノズル質量流量とノズル出口速度の積で表され、背圧増加とともに流体の出口流速が減少するためである。この図5で、ノズル⑩の推力が比較的其他のノズルよりも大きな値を示している。しかし、流量の違いも推力に影響を及ぼすので、この図5より各ノズルの性能を単純に比較することはできない。そこで、入口温度と流量を一定、すなわち入口エネルギーをほぼ一定とした実験を行った。この場合の背圧と推力の関係を図6に示す。図6より細線を設置したノズル⑥, ⑩, ①の推力は、ノズル⑩より最大13%の値を示しており、細線設置の効果が現れる。

**3.4.2 推力係数** ノズル性能を前報<sup>(12)</sup>と同様に推力係数によって評価する。背圧  $P_b$  に対する推力係数  $C_F$  が入口圧力0.77 MPa, 入口サブクール度

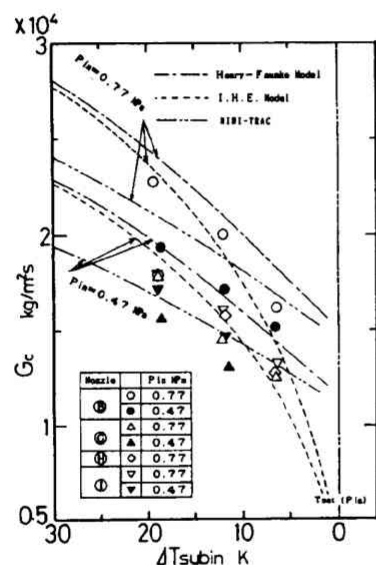


図4 臨界流量

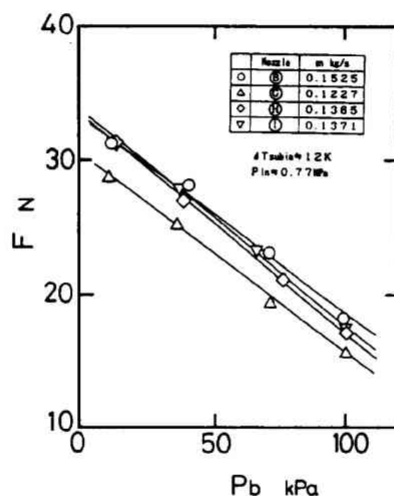


図5 推力

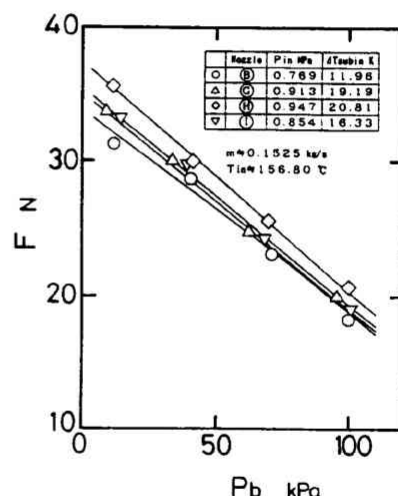


図6 推力

(入口温度、流量一定の場合)

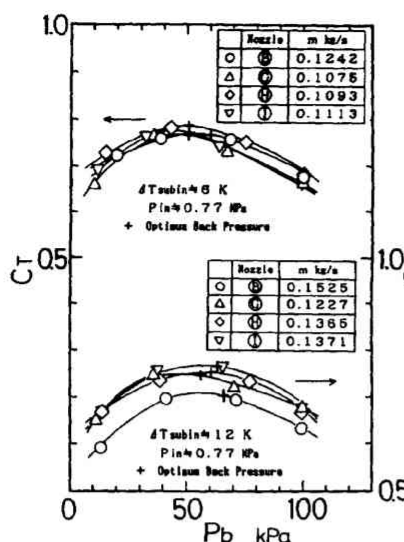


図7 入口サブクール度の推力係数に及ぼす影響

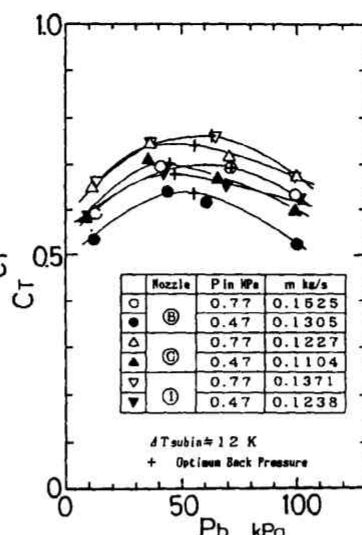


図8 入口圧力の推力係数に及ぼす影響

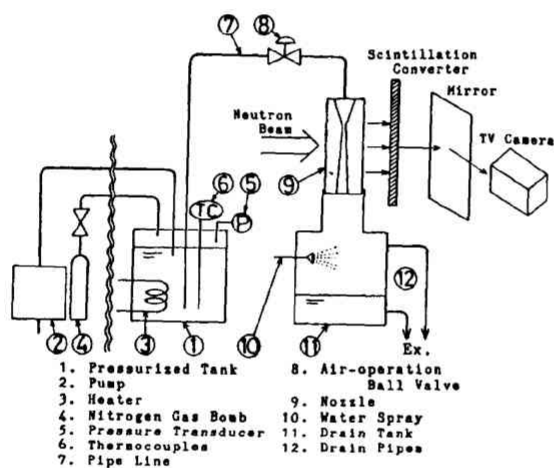


図9 ボイド率測定用実験装置

$\Delta T_{\text{subin}} = 6, 12 \text{ K}$  の二つの場合について、図7に示されている。いずれの場合も、背圧変化に対して  $C_f$  は上に凸状の分布を示し、適正背圧 (図7中、+印) 付近でピーク値を示している。 $P_{\text{in}} = 0.77 \text{ MPa}$  の場合に入口サブクール度の大きい  $\Delta T_{\text{subin}} = 12 \text{ K}$  では細線の設置により推力係数の向上が認められるが、入口サブクール度の小さい  $\Delta T_{\text{subin}} = 6 \text{ K}$  では認められず、いずれの場合も細線直径の推力特性に及ぼす影響は小さい。

図8にノズル⑧、⑨、⑩について  $P_{\text{in}} = 0.47, 0.77 \text{ MPa}$  における、背圧と推力係数の関係が入口サブクール度  $\Delta T_{\text{subin}} = 12 \text{ K}$  に対して示されている。 $P_{\text{in}} = 0.47 \text{ MPa}$  においても細線設置により推力係数の向上していることがわかる。また標準ノズルと細線設置ノ

ズルのいずれの場合にも入口圧力増大によって推力係数の向上が認められる。

#### 4. 中性子ラジオグラフィー (NRT) による可視化および軸方向ボイド率分布

ノズル内の可視化を行うために、中性子ラジオグラフィーを使用し、軸方向ボイド率分布を調べるとともに MINI-TRAC コードによる計算結果と比較する。

##### 4.1 実験装置と実験方法

本実験の装置<sup>(14)(15)</sup>の概要が図9に示されている。図9中の中性子線 (Neutron Beam) 源は

小形サイクロトロン (熱中性子束:  $4.5 \times 10^5 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ),  $C_d$  比: 3, 照射野:  $34.3 \text{ cm} \times 41.65 \text{ cm}$ ) であり、これを用いた実時間中性子ラジオグラフィーシステムが使用された。作動流体の水が压力容器内①で加熱、加圧され、所定の初期温度、初期圧力に設定される。このとき同時にノズル⑨までの配管⑦が容器内の熱水と同温度に加熱されている。条件設定後、試験部⑨に中性子線の照射が開始され、中性子線が安定すると、空気圧式ボールバルブ⑧の開放によりタンク内の高温高压の熱水はブローダウンされ、蛍光板 (Scintillation Converter) よりおよそ  $50 \text{ mm}$  離れて鉛直下向きに設置されたノズル⑨へと供給される。ノズル上部より流入した熱水はのど部近傍で減圧沸騰を起こし、末広部で蒸気-水の二相流となって噴出する。ここで、ノズル内の流れが蛍光板に可視化され、その映像が鏡を介して高性能テレビジョンカメラで撮影される。また、压力容器内圧力、压力容器出口温度はそれぞれ差圧変換器⑤およびクロメル-アルメル熱電対⑥により測定される。

##### 4.2 NRTの実験結果

**4.2.1 可視化結果** NRTによって得られた熱水ブローダウン時の原画像を図10に示す。ノズル先細部では熱水は黒くなっているのが水単相流であり、のど部付近から下流の末広部では白〜黒の点となるのが沸騰し蒸気、水の二相流となっている。これより中性子ラジオグラフィーによりノズル材質のアルミニウムが透視されていることがわかる。

**4.2.2 ボイド率測定結果**  $P_{\text{in}} = 0.58, 0.30 \text{ MPa}$  で  $\Delta T_{\text{subin}} = 7.5 \text{ K}$  の各場合に対して図10と同様の原

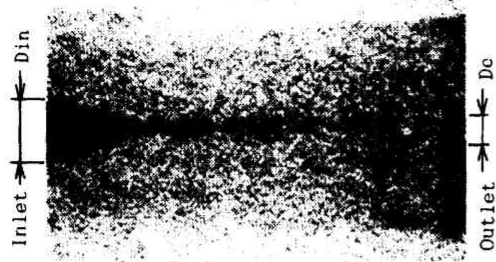


図 10 中性子ラジオグラフィーによる可視化画像

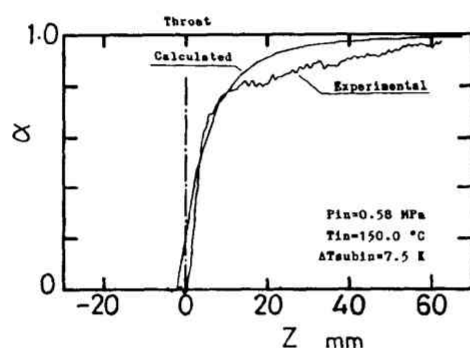
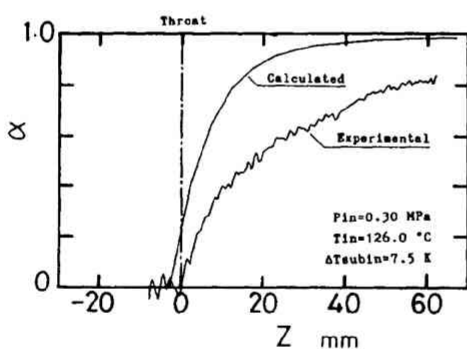
(a)  $P_{in} \approx 0.58 \text{ MPa}$ ,  $\Delta T_{subin} \approx 7.5 \text{ K}$ (b)  $P_{in} \approx 0.30 \text{ MPa}$ ,  $\Delta T_{subin} \approx 7.5 \text{ K}$ 

図 11 軸方向一次元ボイド率分布

画像から画像処理を行い<sup>(15)(18)</sup>求められた軸方向一次元ボイド率分布の測定例と MINI-TRAC コードによる計算結果が図 11(a), (b)におおの示されている<sup>\*\*1</sup>。図 11(a)より NRT による軸方向ボイド率分布はのど部で上昇し始め  $z \approx 10 \text{ mm}$  から徐々に増加する。この結果は Abuaf らの  $\gamma$  線によるノズル内軸方向一次元ボイド率分布測定結果<sup>(16)</sup>と定性的にあっている。一方、実線で示す MINI-TRAC コードによる

<sup>\*\*1</sup> ボイド率測定において中性子線の統計的揺らぎに起因する誤差を文献(19)の方法により評価し、 $2 \times$  標準偏差 平均値を誤差とすると、それは気液二相流部で  $\pm 2.7\%$  であり、他の誤差よりも大きい<sup>(18)</sup>。

計算結果のボイド率はのど部上流 2.5 mm より立ち上がっているが、これは計算結果を各セル中心 (一セル長さ 5 mm) に与えそれらを直線で結んで表示しているためである。 $P_{in} \approx 0.58 \text{ MPa}$  場合の図 11(a)において、計算結果は定性的にも定量的にもほぼ一致し、 $P_{in} \approx 0.54 \text{ MPa}$  以上の他の実験結果でも同じ傾向を示す。しかし、 $P_{in} \approx 0.30 \text{ MPa}$  場合の図 11(b)が測定結果より 0.2~0.4 ほど大きい値を示し、 $P_{in} \approx 0.34 \text{ MPa}$  以下の他の実験結果も同じ傾向である。

なお、図 11(a), (b)の圧力分布の実験結果ではのど部近傍に圧力アンダシュートが両者共に存在し、MINI-TRAC コードによる計算結果は 3・3 節と同様に圧力アンダシュートの評価は小さい。測定軸方向ボイド率分布は図 11(b)の入口圧力の低い場合 (0.30 MPa) に計算結果との差が図 11(a)より大きい。この理由は次のように考えられる。入口圧力がより低い場合に圧力  $P_f$  [図 2 (a)参照] とノズル出口圧力  $P_{ex}$  の圧力差がより小さく [図 2 (a), (b)参照]、密度の大きい液相が末広部でより加速されにくい。したがって、液相と気相の連続の関係から、入口圧力の低い場合に液相の占める断面積割合がより大きくなり、ボイド率がより小さくなったと考えられる。特に圧力アンダシュートの大きい場合に  $P_f$  と  $P_{ex}$  の圧力差はさらに小さくなり、液相の加速はより小さくなると予想される。したがって、 $P_f$  の低い場合、すなわち入口サブクール度の大きいあるいは入口圧力の低い場合に、ノズルののど部上流の細線設置により  $P_f$  をより高くする (すなわち、圧力アンダシュートを低減する) 方法は推力係数改善の効果が大きいと考えられる。また上述したように圧力アンダシュートの存在によらず入口圧力の低いほど液相が加速されにくいことから、3・4・2 項の細線設置の有無によらず入口圧力の高いほうが推力係数の高いことが説明できる。

以上の考察および 3・2 節の考察からわかるように本実験の入口圧力の範囲で圧力分布、臨界流量、ボイド率分布の解析精度を上げるためには、のど部近傍圧力アンダシュートのより正確な計算が必要と考えられる。

## 5. 結 言

入口がサブクール熱水に対してノズル内に設置する細線直径のノズル性能特性に及ぼす影響を調べるとともに、入口圧力、入口サブクール度を変化させた実験を行った。また、中性子ラジオグラフィーを用いてノズル内流れの可視化し、ボイド率分布が求められた。さらに、それらの実験結果を数値解析コード MINI-



TRACによる計算結果と比較した。この結果、本実験範囲で次のことが明らかになる。

(1) 推力係数は、ノズル入口圧力の増大に伴い細線の有無によらず向上する。

(2) 入口サブクール度の大きいほど、細線設置による推力係数改善の効果がある。

(3) 本実験範囲で1.5~0.3 mmの細線直径の圧力分布、推力係数に及ぼす影響は小さい。

(4) アルミニウム製ノズル内二相流の軸方向一次元ボイド率分布を測定した。

(5) 細線の設置されていない標準ノズルの圧力分布、ボイド率分布、臨界流量の解析精度を上げるためには、のど部近傍の圧力アンダシュートの解析精度の向上が必要である。

ボイド率測定実験は、住友重機械工業(株)東予事業所のサイクロトロンを用いた実時間中性子ラジオグラフィシステムにより行ったことを記し謝意を表す。二相流解析コード MINI-TRAC を提供いただいた日本原子力研究所およびコードの使用法をご教示いただいた村尾良夫、秋本肇の両氏に謝意を表す。また実験に協力された学部生 小田勉君に感謝する。

#### 文 献

- (1) Austin, A. L., ほか2名, UCRL-51366(1973).
- (2) 赤川・ほか3名, 機論, 52-480, B(1986), 3052.
- (3) 赤川・ほか3名, 機論, 54-502, B(1988), 1509.
- (4) 赤川・ほか4名, 機論, 50-452, B(1984), 1159.
- (5) Wallis, G. B., *Int. J. Multi-Phase Flow*, 6(1980), 97.
- (6) Comfort, W. J., UCRL-52281(1977).
- (7) 池田・福田, 機誌, 83-745(1980), 82.
- (8) 上方・ほか4名, 機論, 51-463, B(1984), 1017.
- (9) Alger, T. W., UCRL-76417(1975).
- (10) Hokenson, G., *AIAA J.*, 19-12(1981), 1547.
- (11) Akagawa, K., ほか4名, *JSM E Int. J., Ser. 11*, 31-4(1988), 718.
- (12) 赤川・ほか4名, 機論, 55-516, B(1989), 1722.
- (13) 日本原子力研究所, MINI-TRAC マニュアル, (1985).
- (14) 田沢・ほか4名, 住友重機械技報, 35-103(1987), 58.
- (15) Fujii, T., ほか6名, *Proc. Int. Conf. Two-Phase Flows*, Taipei, (1989), 67.
- (16) Abuaf, N., ほか2名, NUREG/CR-1864, BNL-NUREG-51317, 1(1981).
- (17) Henry, R. E. and Fauske, H. K., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 95(1971), 179.
- (18) 浅野, 神戸大学修士論文, (1990).
- (19) Taniguchi, R., *Statistical Properties of Radiographic Image in Neutron Radiography*, (1986), Reidel Pub. Co.
- (20) Fincke, J. R., ほか2名, NUREG/CR-1997(1981).
- (21) Ardron, K. H., *Int. J. Multiphase Flow*, 4(1978), 323.
- (22) Richter, H. J., *Int. J. Multiphase Flow*, 9-5(1983), 511.
- (23) 竹永・ほか3名, 機論, 55-512, B(1989), 1109.
- (24) 中田, 第24回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1987), 428.
- (25) 中田・今井, 第25回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1988), 58.
- (26) 中田・今井, 第27回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1990), 556.